

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЖИГА СИДЕРИТОВ В УСЛОВИЯХ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Дудко В.А., Матюхин В.И.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

Затронута проблема не востребоваемости металлургического сырья. Представлены теоретический расчет длин зон технологического процесса, а также результаты промышленных испытаний обжига мелкой фракции сидерита класса 10–0 мм во вращающейся печи, отапливаемой природным газом в присутствии добавок твердого топлива. Показана возможность достижения выхода обожженной фракции 62,07 % при тепловом кпд агрегата 77,27 %.

Ключевые слова: сидерит, обжиг, технологические зоны, вращающаяся печь, тепловой и материальный балансы.

Address the problem of lack of demand for metallurgical raw materials. Presented theoretical calculation zone lengths process and the results of industrial test firing fine siderite class (10–0) mm in the rotary kiln fired with natural gas in the presence of solid fuel additives. The possibility of reaching the exit of burnt fraction of 62,07 % in the thermal efficiency of the unit 77,27 %.

Keywords: siderite, roasting, processing zones, rotary kiln, heat and material balances.

Бакальское месторождение железных руд, основной минерал которого представлен в виде сидерита (карбоната железа), является одним из крупнейших в Уральском регионе и достигает добычи в настоящее время 1 млрд т в год.

По существующей технологии переработки железных руд на Бакальском рудоуправлении основным видом товарной продукции является концентрат обожженного сидерита (КОС) для агломерации, получаемый после окислительного обжига кусковой фракции 13–80 мм в шахтной печи, ее магнитной сепарации и дробления до агломерационной крупности 10–0 мм. В руднике выход кондиционной руды достигает не более 20–25 %. Образующаяся в цикле подготовки карьерной и шахтной руды к обжигу мелкая фракция размером 13–0 мм, не может быть использована в шахтных печах без дополнительной подготовки из-за существенного снижения газопроницаемости обжигаемого слоя [1]. В настоящее время ее применение ограничено в качестве рудной составляющей шихты на агломерационной фабрике ОАО «Уральская сталь». Основная масса этих компонентов остается не востребованной и складывается на Бакальском рудоуправлении, приводя к потере денежных поступлений.

Для решения этой проблемы предлагается осуществить процесс обжига мелкой фракции во вращающейся печи при совместной подаче в ее рабочее пространство мелкой фракции сидеритовой руды и коксика.

Экспериментальные исследования возможностей обжига мелкой фракции сидеритов класса 10–0 мм производили во вращающейся печи № 3 ОАО «Комбинат «Магнезит» длиной 75 м и внутренним диаметром барабана 3,0 м

Для определения основных массовых потоков на обжиговой печи был составлен ее материальный баланс (табл. 3).

Технологические параметры обжига мелкой фракции сидеритов во вращающейся печи

Параметр	Величина
Расход исходной шихты, кг/ч	17500
Влажность шихты, кг/кг	20,41 %
Средний поток, кг/ч	
сидерит	14000
кокс	3500
Средний расход природного газа, м ³ /ч	1000
Температура шихты на входе в печь, °C	24
Температура материалов на выходе из печи, °C	1150–1204
Температура подсасываемого воздуха из атмосферы, °C	24
Температура отходящих газов в обресе печи, °C	910
Химический состав газов в обресе печи, %:	
CO ₂	17,8
O ₂	1,2
CO	0,1
N ₂	80,9
Запыленность отходящих газов в обресе печи, г/м ³	185
Разрежение в горячей головке, Па	0,5
Выход фракции магнитная/немагнитная, %/%	85/15

Усредненный химический состав исходных рудных компонентов и продуктов обжига

Материал	Химический состав, %			
	Fe _{общ.}	FeO	Fe _{мет}	ППП
Исходный сидерит	20,55	28,98	0,0	46,04
Обоженная магнитная фракция	50,73	20,28	33,42	14,9
Обоженная немагнитная фракция	4,08	6,35	2,85	66,23

Таблица 3

Материальный баланс вращающейся печи для обжига сидеритов

Приход массы			Расход массы		
Наименование статей	Количество		Наименование статей	Количество	
	Кг/ч	%		Кг/ч	%
1. Расход сидеритов	14000	41,95	1. Обожженный продукт	8689,66	26,04
2. Расход кокса	3500	10,49	2. Отходящие газы	20887,42	62,61
3. Расход природного газа	215	0,64	3. Выбросы пыли	3796,80	11,38
4. Расход воздуха	15658,88	46,92			
Итого приход массы	33373,88	100,00	Итого расход массы	33373,88	100,00

Анализ полученных данных позволяет установить, что в приходной части материального баланса обжиговой печи доля твердых компонентов составляет 17 500 кг/ч или 52,44 %. Доля обожженного продукта при этом составляет всего 26,04 % при его выходе из сидерита только 62,07 %. Обращает на себя внимание существенная доля пылевых выбросов из печи (11,38 %), которые улавливаются в системе газоочистки.

По данным материального баланса был составлен тепловой баланс печи (табл. 4).

Таблица 4

Тепловой баланс вращающейся печи для обжига сидеритов

Приход теплоты			Расход теплоты		
Наименование статей	Количество		Наименование статей	Количество	
	кВт	%		кВт	%
1. Химическая теплота, в том числе: кокса природного газа	34073,75	96,59	1. Физическая теплота обожженного продукта	3017,18	8,55
	24115,97	68,36			
	9957,78	28,23			
2. Физическая теплота подогретого воздуха	1201,59	3,41	2. Физическая теплота отходящих газов	5471,24	15,51
			3. Физическая теплота пыли	969,34	2,75
			4. Потери теплоты с химическим недожогом	72,4	0,21
			5. Теплота эндотермических реакций	24241,37	68,72
			6. Потери теплоты в окружающую среду	1503,81	4,26
Итого приход теплоты	35275,34	100,0	Итого расход теплоты	35275,34	100,00

Анализ статей теплового баланса показал, что тепловой КПД агрегата при обжиге мелкой фракции сидеритов составляет $8,55 + 68,72 = 77,27\%$ благодаря использованию внутреннего источника тепла в виде горящего кокса. При этом основными источниками теплоты во вращающейся печи являются кокс и природный газ, сжигаемые в рабочем пространстве печи. Так как в процессы исследований разделить тепловой эффект экзо- и эндотермических реакций не представлялось возможным, то при составлении теплового баланса определялся их суммарный результат.

Основные тепловые потери на печи связаны с физическим теплом готового продукта (8,55 %), который частично утилизируется в барабанном холодильнике в виде физического тепла подогретого воздуха в количестве 3,41 % с его возвратом в рабочее пространство, а также физическое тепло отходящих газов, утилизация которых может осуществляться с применением теплоэнергетического оборудования. Обращает на себя внимание повышенная доля потерь тепла с пылью. Ее утилизация может быть обеспечена с применением отдельных теплообменников устанавливаемых в осадительной пылевой камере.

Длины технологических зон

Зона сушки

$$\Delta L_c = G_{\text{ш}} (W' - W'') / (\Delta \omega \cdot F),$$

где $G_{\text{ш}}$ – производительность печи, т/ч; W' и W'' – начальная и конечная влажность шихты, в долях единицы; $\Delta \omega$ – допустимое напряжение рабочего пространства сушильной зоны по удаляемой влаге, $m/(m^3 \cdot \text{ч})$; F – площадь поперечного сечения рабочего пространства печи, m^2 .

$$\Delta L_c = G_{\text{ш}} (W' - W'') / (\Delta \omega \cdot F) = 17,5(0,2041 - 0) / (0,08 \cdot 3,14 \cdot (1,5)^2) = 6,27 \text{ м.}$$

Зона подогрева

$$\Delta L_{\text{подогр}} = G_i \cdot Q_i / [(q_{\text{л}} + q_{\text{к}}) l_x],$$

где G_i – производительность зоны печи с учетом изменения массы шихты, т/ч; Q_i – затраты теплоты в зоне на компенсацию тепловых потерь эндотермических реакций и физическую теплоту газов и пыли, кВт; l_x – ширина поверхности слоя материала, м; $q_{\text{л}}$ – лучистый тепловой поток на материал от газов и кладки, Вт/м²; $q_{\text{к}}$ – конвективный тепловой поток, Вт/м².

$$l_x = D \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 3 \cdot \sin \frac{80}{2} = 3 \cdot 0,64 = 1,92 \text{ м,}$$

где D – внутренний диаметр рабочего пространства, α – центральный угол шихты в поперечном сечении печи, который для зоны подогрева может быть принят равным 80...85 °С, а для зоны кальцинации – 75...80 °С.

$$q_{\text{л}} = C_{\text{ГКМ}} \cdot \left[\left(\frac{\bar{T}_{\text{Г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right] = 5,67 \cdot \left[\left(\frac{848}{100} \right)^4 - \left(\frac{673}{100} \right)^4 \right] = 15598,5 \text{ Вт/м}^2,$$

где $C_{\text{ГКМ}}$ – приведенный коэффициент излучения системы газ–кладка–материал, $\bar{T}_{\text{Г}}$, $\bar{T}_{\text{М}}$ – средние температуры газов и материала в пределах зоны, К.

$$\bar{T}_{\text{Г}} = \frac{t'_{\text{Г}} + t''_{\text{Г}}}{2} + 273 = \frac{550 + 600}{2} + 273 = 848 \text{ К},$$

$$\bar{T}_{\text{М}} = \frac{t'_{\text{М}} + t''_{\text{М}}}{2} + 273 = \frac{300 + 500}{2} + 273 = 673 \text{ К},$$

где $t'_{\text{Г}}$ и $t'_{\text{М}}$ – соответственно температура газа и материала на входе в зону; $t''_{\text{Г}}$ и $t''_{\text{М}}$ – соответственно температура газа и материала на выходе из зоны.

$$q_{\text{к}} = 10,476 \cdot w_0 \cdot (\bar{T}_{\text{Г}} - \bar{T}_{\text{М}}) = 10,476 \cdot 5,8 \cdot (848 - 673) = 10633,14 \text{ Вт/м}^2,$$

где w_0 – скорость движения газов, м/с.

$$w_0 = \frac{V_0}{F - F_{\text{М}}} = \frac{20887,42 \cdot 10^{-3}}{(3,14 \cdot 1,5^2) - 3,55} = 5,8 \text{ м/с},$$

где V_0 – расход отходящих газов в печи; F – поперечное сечение рабочего пространства печи, м²; $F_{\text{М}}$ – площадь сечения, занятого в печи материалом.

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{подогр}} &= G_i \cdot Q_i / [(q_{\text{л}} + q_{\text{к}}) \cdot l_{\text{x}}] = \\ &= 13,9 \cdot 1503,81 / [(15598,5 + 10633,14) \cdot 1,92] = 0,41 \text{ м}. \end{aligned}$$

Зона разложения карбонатов

$$\begin{aligned} \Delta L_{\text{р}} &= G_i \cdot Q_i / [(q_{\text{л}} + q_{\text{к}}) \cdot l_{\text{x}}] = \\ &= 13,9 \cdot 24241,37 / [(10858 + 4557) \cdot 1,92] = 11,4 \text{ м}. \end{aligned}$$

$$\bar{T}_{\text{Г}} = \frac{t'_{\text{Г}} + t''_{\text{Г}}}{2} + 273 = \frac{600 + 650}{2} + 273 = 898 \text{ К}.$$

$$\bar{T}_{\text{М}} = \frac{t'_{\text{М}} + t''_{\text{М}}}{2} + 273 = \frac{500 + 600}{2} + 273 = 823 \text{ К}.$$

$$q_{\text{л}} = C_{\text{ГКМ}} \cdot \left[\left(\frac{\bar{T}_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right] = 5,67 \cdot \left[\left(\frac{898}{100} \right)^4 - \left(\frac{823}{100} \right)^4 \right] = 10858 \text{ Вт/м}^2.$$

$$q_{\text{к}} = 10,476 \cdot w_0 \cdot (\bar{T}_{\Gamma} - \bar{T}_{\text{М}}) = 10,476 \cdot 5,8 \cdot (898 - 823) = 4557 \text{ Вт/м}^2.$$

Зона окисления FeO

$$\bar{T}_{\Gamma} = \frac{t'_{\Gamma} + t''_{\Gamma}}{2} + 273 = \frac{650 + 750}{2} + 273 = 973 \text{ К.}$$

$$\bar{T}_{\text{М}} = \frac{t'_{\text{М}} + t''_{\text{М}}}{2} + 273 = \frac{600 + 700}{2} + 273 = 923 \text{ К.}$$

$$q_{\text{л}} = C_{\text{ГКМ}} \cdot \left[\left(\frac{\bar{T}_{\Gamma}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\bar{T}_{\text{М}}}{100} \right)^4 \right] = 5,67 \cdot \left[\left(\frac{973}{100} \right)^4 - \left(\frac{923}{100} \right)^4 \right] = 9667 \text{ Вт/м}^2.$$

$$q_{\text{к}} = 10,476 \cdot w_0 \cdot (\bar{T}_{\Gamma} - \bar{T}_{\text{М}}) = 10,476 \cdot 5,8 \cdot (973 - 923) = 3038 \text{ Вт/м}^2.$$

$$Q_{\text{экз}} = \Delta H \cdot \frac{m}{M} = 450 \cdot \frac{3,8}{0,07} = 24428 \text{ кВТ}$$

$$\Delta L_{\text{окисл}} = G_i \cdot Q_i / [(q_{\text{л}} + q_{\text{к}}) \cdot l_{\text{x}}] =$$

$$= 13,9 \cdot 24428 / [(9667 + 3038) \cdot 1,92] = 13,9 \text{ м.}$$

Зона спекания

$$\Delta L_{\text{спек}} = 0,94 \cdot D \cdot \gamma \cdot n = 0,94 \cdot 3 \cdot 1,3 \cdot 3 = 11 \text{ м.}$$

Зона охлаждения

$$\Delta L_{\text{охл}} = 0,58 \cdot D \cdot \gamma \cdot n = 0,58 \cdot 3 \cdot 1,3 \cdot 3 = 6,8 \text{ м [2].}$$

Таким образом, проведенные испытания по обжигу мелкой фракции сидеритов во вращающейся печи показали возможность достаточно полного завершения основных физико-химических преобразований в их структуре преимущественно в режиме твердофазного спекания с получением частично металлизированного продукта при его химическом выходе до 62,07 %.

Использование комбинированного топлива в виде добавок кокса в шихту и природного газа при его факельном сжигании обеспечивают высокий тепловой КПД агрегата (77,27 %) с минимальными тепловыми потерями с отходящими газами (15,51 %), химическим недожогом (0,21 %) и в окружающую среду через стенки печи (4,26 %).

Список использованных источников

1. Юрьев Б.П., Меламуд С.Г. Исследование механизма и кинетики диссоциации бакальских сидеритов при термообработке // *Металлы*, 1998. – № 3. – С. 3–9.
2. *Теплотехнические расчеты печей глиноземного производства: Учебное пособие для вузов* / С.Н. Гуцин, С.Г. Майзель, В.И. Матюхин, В.А. Гольцев. Екатеринбург: УГТУ, 2000.